

щен целый ряд методических пособий по численному моделированию рабочего процесса лопаточных машин. Существенным преимуществом курса представляется фактически самостоятельное проведение студентами лабораторных работ по определению экспериментальных характеристик малоразмерных лопаточных венцов, компрессоров и турбин.

Курс испытаний авиационных двигателей в настоящее время обеспечен соответствующим учебником [4] в двух его изданиях и целым комплексом методических пособий. Кроме того, основным преимуществом данной дисциплины Самарского университета является возможность проведения лабораторных работ с запуском двигателей на базе:

- малоразмерного турбореактивного двигателя ТС-12;
- малоразмерного имитатора турбовинтового двигателя ДГ-4м;
- полноразмерного двухконтурного турбореактивного двигателя АИ-25,
- а также экспериментального определения высотных и климатических характеристик малоразмерного газотурбинного двигателя в термобарокамере.

Курсы, связанные с изучением рабочего процесса камер сгорания, обеспечены двумя монографиями [5,6] и целым комплексом методических пособий. Особенностью этих курсов является материал, посвященный организации рабочих процессов в камерах сгорания с низким уровнем выделения токсичных веществ, камерах сгорания малоразмерных газотурбинных двигателей и ка-

талитических камерах сгорания с микро-вихревыми матрицами.

Библиографический список

1. Кулагин В.В., Кузьмичев В.С. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. 4-е изд. В 2 кн. Кн. 1. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. - М.: Инновационное машиностроение, 2017. - 336 с.
2. Кулагин В.В., Кузьмичев В.С. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. 4-е изд. В 2 кн. Кн. 2. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. - М.: Инновационное машиностроение, 2017. - 280 с.
3. Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М. Теория и расчёт авиационных лопаточных машин: учебник - Самара: ФГУП «Изд-во «Самарский Дом печати», 2003.-336 с.
4. Григорьев, В.А. Испытания авиационных двигателей: Учебник для вузов / под общ. ред. В.А. Григорьева и А.С. Гишварова. 2-е изд., доп. - М.: Инновационное машиностроение, 2016. - 542 с.
5. Ланский А.М., Лукачев СВ., Матвеев С.Г. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД - Самара: изд-во СНЦ РАН, 2009. - 335с.
6. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей / В.П. Данильченко, СВ. Лукачёв, Ю.Л. Ковылов и др. - Самара: изд-во СНЦ РАН, 2008. - 620с.

УДК 539.4.4

ОБЗОР АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЁТА СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

©2018 Н.В. Осадчий¹, В.А. Малышев², В.Т. Шепель¹

¹ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск,

²Рыбинский авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва

ANALYSIS OF ANALYTICAL METHODS OF STATIC STRENGTH CALCULATIONS OF MULTI-LAYER STRUCTURES WITH HONEYCOMB FILLER

Osadchiy N.V., Shepel V.T. (PJSC «UEC-Saturn», Rybinsk, Russian Federation)

Malyshev V.A. (P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation)

Nowadays an explosive growth of publications dedicated to static strength calculations of multi-layer structures with honeycomb filler is observed; therefore, a report covers the analysis of foreign and domestic works in analytical computation methods of multi-layer structures with honeycomb filler.

Многослойные конструкции с сотовым заполнителем широко используются в авиационных двигателях для элементов шумоглушения. Расчёты на прочность многослойных конструкций выполняются в рамках той или иной аналитической модели. Цель данной работы: обзор работ, посвящённых аналитическим моделям, которые используются при расчёте на прочность многослойных конструкций с сотовым заполнителем.

При построении аналитических моделей многослойных конструкций необходимо соблюсти условия непрерывности продольных перемещений и условия непрерывности поперечных напряжений на наружной и внутренней поверхностях, а также на границе слоёв [6].

Многослойные конструкции с сотовым заполнителем обладают высокой поперечной анизотропией упругих свойств [6]. Это приводит к резкому изменению угла наклона поперечного сечения при переходе границы слоёв, что выражается в зигзагообразной эпюре продольных перемещений [6]. Описание такой эпюры связано с определёнными математическими сложностями.

Наиболее точными и универсальными являются модели, основанные на решении трёхмерной задачи упругости, не требующие введения упрощающих гипотез. Так в работе [1] использованы универсальные дифференциальные уравнения равновесия трёхмерной теории упругости в перемещениях, записанные для многослойной сферической оболочки. Процедура решения записана в матричной форме. Решение получено методом Навье. В работе [2] трёхмерная задача теории упругости решена в перемещениях для многослойной прямоугольной в плане пластины, стороны которой имеют шарнирное закрепление. Решению трёхмерной задачи теории упругости многослойных пластин посвящены так же работы [3 – 5]. Недостатком таких моделей является математическая сложность и ограниченный круг условий закрепления. В инженерной практике такие модели широкого распространения не получили.

Наибольшее распространение получили модели, основанные на сведении трёхмерной задачи теории упругости к двумерной посредством введения упрощающих гипотез об изменении поперечных напряжений (пере-

мещений) по толщине слоя или по толщине пакета слоёв. Модели, построенные на этом принципе известны как эквивалентные однослойные модели. Их основное преимущество – количество неизвестных функций не зависит от количества слоёв. Профессор Reissner [7] показал, что независимыми являются только поперечные касательные и нормальные напряжения. Достаточно ввести гипотезы для этих напряжений. Перемещения можно получить посредством интегрирования соотношений Коши, в которых деформации определяются на основании введённых гипотез для напряжений через закон Гука. Можно ввести гипотезы для продольных перемещений. В этом случае напряжения определяются из дифференциальных уравнений равновесия Коши [8, 9].

Для аппроксимации перемещений по толщине пакета слоёв применяется степенной ряд Тэйлора. При увеличении показателя степени поперечной координаты увеличивается точность расчёта, однако, увеличение показателя степени сопровождается введением дополнительной неизвестной функции. Поэтому для построения моделей высокого порядка широкое распространение получили ряды, составленные из тригонометрических [10], гиперболических [11], показательных функций [12] или их комбинации [13]. Они позволяют увеличить порядок кривой, по которой деформируется поперечное сечение, без увеличения количества неизвестных функций.

Эквивалентные однослойные модели, основанные на аппроксимации перемещений (напряжений) по всей толщине пакета слоёв, не позволяют точно повторить зигзагообразную эпюру продольных перемещений. В связи с этим, они не дают необходимой точности предсказания межслоевых касательных напряжений. От этих недостатков свободны эквивалентные однослойные модели (ZZ модели), основанные на введении для каждого слоя функций, аппроксимирующих по толщине напряжения или перемещения. Первые ZZ модели предложены в работах [14 – 15]. Широкое распространение получили ZZ модели, основанные на универсальном разложении по базисным функциям, которое было предложено Carrera в работе [16]. В качестве базисных функций используются

ряды, состоящие из полиномов Лагранжа, Чебышева, тригонометрических, степенных и прочих функций. Подобный подход с применением в качестве базисных функций степенных рядов был предложен Алфутовым в работе [17].

Другой тип двумерных аналитических моделей многослойных конструкций, известный как модели с дискретными слоями, основан на введении для каждого слоя функций, аппроксимирующих перемещения (напряжения) как по толщине, так и по длине слоя. Такие модели предложены Григолюком [18] и Болотиным [19]. Теория моделей с дискретными слоями развита так же в работах [20, 21]. Модели с дискретными слоями дают наилучшее приближение к результатам расчётов, полученных методами трёхмерной упругости. Их недостаток – количество неизвестных функций увеличивается с увеличением количества слоёв.

Анализ литературы показал, что для построения аналитических моделей целесообразнее использовать модели с дискретными слоями, позволяющими получить хорошую точность при приемлемой вычислительной сложности.

Библиографический список

1. Brischetto S., Exact three-dimensional static analysis of single- and multi-layered plates and shells, *Composites Part B*, 119, 2017, pp. 230 – 252.
2. Srinivas S., Rao A. K. Bending, vibration and buckling of simply supported thick orthotropic rectangular plates and laminates. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 6, 1970, pp. 1463 – 1481.
3. Pagano N.J., Exact Solutions for Composite Laminates in Cylindrical Bending, *Journal of Composite Materials*, 3, 1969, pp. 389-411.
4. Pagano, N.J., Exact Solutions for Rectangular Bidirectional Composites and Sandwich Plates, *Journal of Composite Materials*, 4, 1970, pp. 20-34.
5. Holt P.J, Webber J.B.H. Exact solutions to some honeycomb sandwich beam, plate and shell problems. *J Strain Anal Eng.*, 1982, 17 (1), pp. 1–8.
6. E. Carrera. Theories and Finite Elements for Multilayered, Anisotropic, Composite Plates and Shells. *Arch. Comput. Meth. Engng.* 2002, Vol. 9, (2), pp. 87-140.
7. Reissner, E., 1984. On a certain mixed variational theorem and a proposed application. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 20 (7), 1366–1368.
8. Tessler, A., Di Sciuva, M., Gherlone, M., A consistent refinement of first-order shear deformation Theory for laminated composite and sandwich plates using improved zigzag kinematics, *Journal of mechanics of materials and structures*, 5, (2), 2010, 341 – 367.
9. Groh R. M., Weaver P. M. On displacement – based and mixed – variational equivalent single layer theories for modeling highly heterogeneous laminated beams. *International Journal of Solids and Structures*, 59. 2015, 147 – 170.
10. Sayyad AS, Ghugal YM. Static flexure of soft core sandwich beams using trigonometric shear deformation theory. *Mech Adv Compos Struct*, 2015;2(1), 45 - 53.
11. Karama M, Afaq KS, Mistou S. Mechanical behaviour of laminated composite beam by the new multi-layered laminated Composite Structure model with transverse shear stress continuity. *Int J Solids Struct* 2003; 40:1525–46.
12. Soldatos, K.P., A transverse shear deformation theory for homogeneous monoclinic plates. *Acta. Mech.* 94, 1992, 195–220.
13. J. Yarasca, J.L. Mantari, M. Petrolo, E. Carrera., Best Theory Diagrams for cross-ply composite plates using polynomial, trigonometric and exponential thickness expansions. *Composite Structures* 161 (2017) 362–383.
14. Лехницкий С. Г, Расчёт на прочность композитных балок, *Вестник инженеров и техников*, № 9, 1935 г.
15. Амбарцумян С. А., Теория анизотропных пластин (прочность, устойчивость и колебания). Москва, Наука, 1967, 268 с.
16. Carrera, E., Theories and finite elements for multi-layered plates and shells: a unified compact formulation with numerical assessment and benchmarking. *Arch. Comput. Methods Eng.* 2003, 10 (3), 5216–5296.
17. Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Б. Г., Расчёт многослойных пластин и оболочек из композиционного материала. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
18. Григолюк Э. И., Чулков П. П., Критические нагрузки трехслойных цилиндрических и конических оболочек, Западно-Сибирское книжное издательство, Новосибирск, 1966, 221 с.

19. Болотин В. В., Новичков Ю. В., Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.

20. A. Pagani, Y. Yan, E. Carrera, Exact solutions for static analysis of laminated, box and

sandwich beams by refined layer-wise theory, Composites Part B 131, 2017, pp. 62 – 75.

21. M. Filippi, E. Carrera, Bending and vibrations analyses of laminated beams by using a zig-zag-layer-wise theory, Composites Part B, 98, 2016, pp. 269 – 280.

УДК 536:537:546:621.45

НЕКОТОРЫЕ ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГОРЮЧЕГО И ОХЛАДИТЕЛЯ

©2018 В.А. Алтунин, Н.Б. Давлатов, М.А. Зарипова

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

SOME WAYS OF INCREASE OF LIQUID HYDROCARBON FUEL AND COOLANT THERMOPHYSICAL AND THERMODYNAMIC PROPERTIES

Altunin V.A., Davlatov N.B., Zaripova M.A. (Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation)

The current paper contains some results of experimental research with liquid hydrocarbon fuel and coolant when it has hydrocarbon fullerenes that was an impact to elaborate ways of its thermophysical properties increase.

В докладе показаны результаты экспериментальных исследований с жидким углеводородным горючим и охладителем при добавках в него углеводородных фуллеренов, на основе чего разработан способ повышения его теплофизических свойств.

В докладе сделан обзор и анализ научно-технической и патентно-лицензионной литературы о способах возможного увеличения теплофизических свойств (ТФС) жидких углеводородных горючих и охладителей.

Авторами предложен новый способ – путём внедрения в жидкое углеводородное горючее (охладитель) углеводородных фуллеренов.

Была создана экспериментальная база, проведены всесторонние исследования в условиях естественной конвекции жидкого углеводородного горючего (охладителя) – гидразина.

Эксперименты проводились при давлениях $p = (0,01-49,01)$ МПа и температурах $T = (293-673)$ К. Применялись фуллерены типа C_{60} , C_{70} , C_{84} при их концентрациях $n = (0,1-0,5)\%$.

Экспериментально обнаружено и подтверждено, что при внедрении до 0,5% масс фуллеренов происходит повышение теплоёмкости и теплопроводности до 16% и 20%

соответственно. Также показаны результаты влияния температуры и давления.

Разработаны и показаны пути повышения теплофизических свойств жидкого углеводородного горючего и охладителя (гидразина) при внедрении в него углеводородных фуллеренов при различных рабочих параметрах по давлению и температуре.

Гидразин с внедрёнными в него углеводородными фуллеренами возможно применять как отдельное углеводородное горючее (топливо) или охладитель, а также – в составе смеси с другими жидкими углеводородными горючими (топливами).

Разработаны и показаны пути применения результатов экспериментальных исследований и патентов на изобретения РФ в двигателях, энергоустановках и техносистемах наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования на жидких углеводородных горючих и охладителях с улучшенными теплофизическими свойствами.

Применение результатов исследования будет способствовать повышению надёжности, эффективности и безопасности существующих и перспективных двигателей, энергоустановок и техносистем различного применения и базирования.